

PENGHARGAAN

Segala puji-pujian bagi Allah S.W.T. yang maha pengasih lagi maha penyayang, serta selawat dan salam kepada jujungan besar Nabi Muhammad S.A.W. Alhamdulillah, syukur saya kehadiran Allah S.W.T. yang mana memberi kekuatan dan kelapangan kepada saya dalam menyempurnakan penulisan tesis ini.

Pertamanya, saya dengan sukacitanya ingin mengucapkan setinggi-tinggi penghargaan dan terima kasih kepada Penyelia saya, Profesor Madya Dr. Mohd. Zulkifly Abdullah dan Dr. Ahmad Zulfa Mohd. Kassim yang mana telah banyak memberi dorongan dan tunjuk ajar secara berterusan dalam menjayakan kajian projek diperingkat pengajian master ini. Mereka berdua adalah orang yang komited, sentiasa menjadi tempat rujukan dan penyelesaian masalah khususnya dalam bidang kajian saya iaitu Mekanik Bendalir.

Saya juga ingin mengucapkan penghargaan dan terima kasih kepada semua rakan-rakan pengajian, Azmi, Muhad, Khalil, Hamid, Sharupuddin dan Shidi diatas sokongan dan perbincangan secara individu dan bersama dalam menjayakan objektif kajian saya ini. Begitu juga terima kasih saya kepada Dekan, Timbalan Dekan dan staf sokongan Pusat Pengajian Kejuruteraan Mekanik terutamanya Staf-Staf Teknikal seperti En. Najhan, En. Zaimi, En. Norijas, En. Komarudin, En. Wan Amri dan lain-lain lagi diatas pertolongan dan kerjasama yang diberikan semasa mengadakan ujikaji di makmal-makmal mereka.

Tidak lupa juga, terima kasih saya yang tak terhingga kepada semua keluarga yang dikasihi terutama isteri dan anak-anak yang memberi dorongan, semangat serta sokongan padu kepada saya dalam menjayakan pengajian ini. Seterusnya ribuan terima kasih saya kepada semua individu-individu yang tak tersebut namanya, telah memberi kerjasama secara langsung atau tak langsung semasa pengajian saya ini.

Akhir sekali, saya dengan bangga dan besarhati mengucapkan setinggi penghargaan kepada Bahagian Biasiswa Kementerian Pendidikan Malaysia, yang mana telah menaja saya dalam membiayai pengajian ini, serta kepada Universiti Sains Malaysia kerana memberi peluang kepada saya dalam menyempurnakan program pengajian master ini.

SENARAI KANDUNGAN

Muka surat

PENGHARGAAN.....	ii
SENARAI KANDUNGAN.....	iv
SENARAI JADUAL.....	vi
SENARAI RAJAH.....	vii
SENARAI TATANAMA.....	viii
SENARAI SIMBOL.....	ix
SENARAI SINGKATAN.....	x
ABSTRAK.....	xi
ABSTRACT.....	xii

BAB 1: PENGENALAN

1.0	Pengenalan.....	1
1.1	Asas Lapisan Sempadan.....	2
1.2	Aplikasi Lapisan Sempadan Gelora.....	3
1.3	Pernyataan Masalah.....	5
1.4	Objektif.....	6

BAB 2: KAJIAN ILMIAH

2.0	Kajian lapisan Sempadan keatas pelbagai permukaan kekasaran.....	7
2.1	Kajian lapisan sempadan gelora ke atas kekasaran permukaan plat rata.....	8
2.2	Kajian lapisan sempadan ke atas kekasaran permukaan yang dihabakan.....	16
2.3	Kajian lapisan sempadan ke atas kekasaran permukaan yang berputar.....	18
2.4	Ringkasan Keseluruhan dari Kajian Ilmiah	22

BAB 3: PENYEDIAAN EKSPERIMEN

3.0	Pemasangan Eksperimen.....	24
3.1	Alat Pengukuran PIV.....	27

3.1.1	Pengenalan.....	27
3.1.2	Prinsip Asas PIV.....	27
3.2	Penyediaan Spesimen.....	30
3.3	Proses Kajian.....	31
3.4	Proses Carta Aliran Kerja.....	34
3.5	Ralat Eksperimen Dan Ketidaktentuan.....	35
3.5.1	Ralat Dalam Pengukuran PIV.....	35
3.5.2	Anggaran Bagi Ketidaktentuan Vektor Halaju	36
3.5.3	Alat Komponen Dalam Terowong Air Litar Tertutup.....	37
3.5	Keputusan Grafik.....	37

BAB 4: KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

4.0	Jenis Aliran.....	41
4.1	Profil Halaju Pada Panjang Lokasi Plat x Terhadap Kekasaran Permukaan yang Berbeza.....	43
4.2	Kesan Kekasaran Permukaan Kepada Ketebalan Lapisan Sempadan.....	48
4.3	Kesan Nombor Reynolds Dan Halaju Bebas (U_{∞}) Terhadap Ketebalan Lapisan Sempadan.....	52
4.4	Hubungan Y^+ dan U^+ Di Sepanjang Plat Rata.....	56
4.5	Kesan Halaju Bebas (U_{∞}) Terhadap Hubungan U^+ dan Y^+	59
4.6	Kesan Kekasaran Permukaan Terhadap Hubungan U^+ dan Y^+	62

BAB 5: KESIMPULAN

5.0	Kesimpulan.....	63
5.1	Cadangan Pembaikan Untuk Kajian Masa Depan.....	66

SENARAI RUJUKAN.....	67
-----------------------------	-----------

LAMPIRAN

Lampiran A: Contoh Pengiraan Profil Halaju, Ketebalan Lapisan Sempadan.....	70
Lampiran B: Gambar Peralatan Bagi Proses Penyediaan Spesimen.....	71
Lampiran C: Sampel Data Dari PIV Bagi Permukaan Licin.....	72

SENARAI JADUAL

	Muka surat
3.1 Spesifikasi Terowong Air Litar Tertutup	25
3.2 Saiz Spesimen Dan Kekasaran Permukaan	30
3.3 Ralat Dalam Sistem Pengukuran PIV	35
4.1 Halaju Dan Nombor Reynolds	42
5.1 Perbandingan beberapa parameter lapisan sempadan eksperimen dengan teori.	65

SENARAI RAJAH

	Muka surat
1.1 Lakaran Lapisan Sempada Pada Plat Rata	2
1.2 Lakaran Lapisan Sempadan Pada Aerofoil	5
3.1 Skimatik Terowong Air Litar Tertutup	26
3.2 Gambar Terowong Air Litar Tertutup	26
3.3 Gambar Sistem PIV	27
3.4 Prinsip Asas PIV	28
3.5 Kawasan Pemicitan	29
3.6 Proses Rakaman Partikel Pada Spesimen	32
3.7 Gambarajah Kedudukan Plat Spesimen	32
3.8 Keputusan Grafik	38
3.9 Vektor Aliran Bendalir Pada Permukaan Spesimen	40
4.1 Kesan Kekasaran Permukaan Pada Halaju Bebas 0.24 m/s	45
4.2 Kesan Kekasaran Permukaan Pada Halaju Bebas 0.59 m/s	48
4.3 Kesan Kekasaran Permukaan Kepada BLT	51
4.4 Kesan Nombor Reynolds (Halaju Bebas) Kepada BLT	55
4.5 Hubungan Y^+ dan U^+ Di Sepanjang Plat Rata	59
4.6 Hubungan Y^+ dan U^+ Untuk Halaju Yang Berbeza	61
4.7 Hubungan Y^+ dan U^+ Untuk Pelbagai Kekasaran Permukaan	62

SENARAI TATANAMA

Re	nombor Reynolds
U_e	halaju bebas ($m \cdot s^{-1}$)
Re_c	nombor Reynolds peralihan
Tu_∞	keamatan gelora (turbulent intensity)
D_h	diameter hidraulik (m)
A_C	luas kawasan rentas (m^2)
P	ukur keliling (m)
U_∞	halaju arus bebas ($m \cdot s^{-1}$)
u	halaju tempatan ($m \cdot s^{-1}$)
Y	ketinggian lapisan (m)
x	panjang titik di atas spesimen (m)
y	jarak dari permukaan (m)
U^+	halaju tanpa dimensi $= U/u\tau$
Y^+	ketinggian lapisan tanpa dimensi $= yU^+/\nu$
u'	Halaju turunaik (rms) pada arah y ($m \cdot s^{-1}$)
w'	Halaju turunaik (rms) pada arah z ($m \cdot s^{-1}$)

SENARAI SIMBOL

μ	kelikatan dinamik ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
ρ	Ketumpatan ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
ν	kelikatan kinematik ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
u_τ	halaju geseran ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
τ_w	tegasan ricih pada permukaan (Pa)
∂	ketebalan lapisan sempadan (m)

SENARAI SINGKATAN

PIV	Particle Image Velocimetry
LDA	Laser Dropped Anomemetry
DPTV	Digital Particle Tracking Velocimetry
LES	Large Eddy Simulation
3-D	Three-Dimensional
PLIF	Planar-induced Fluorescence
PDFs	Probability Density Functions
PVC	Polyvinyl Chloride
CCD	Charge Coupled Device
FFT	Fourier transform techniques
BLT	Boundary Layer Thickness
CFD	Computational Fluid Dynamic

KESAN KEKASARAN PERMUKAAN KE ATAS LAPISAN SEMPADAN PADA PLAT RATA

ABSTRAK

Kajian terhadap fenomena lapisan sempadan telah dikaji secara meluas terutamanya dalam bidang aerodinamik, rekabentuk automotif dan pemindahan haba peranti aliran mikro. Kajian ini dijalankan untuk mengurangkan daya seretan dan mengoptimumkan penggunaan tenaga, sekaligus mengurangkan penggunaan bahanapi. Dalam kajian ini, kesan tiga kekasaran permukaan dalam lingkungan 0.28 hingga 4.82 μm dan empat nombor Reynolds dalam lingkungan 10800 hingga 28800 terhadap ketebalan lapisan sempadan telah dijalankan. Selain itu, kesan x iaitu panjang spesimen pada satah melintang juga dikaji. Eksperimen ini dijalankan dalam terowong air litar tertutup manakala keputusan diperolehi itu ditaksir dengan menggunakan sistem PIV. Berpandukan keputusan yang diperolehi, permukaan kasar menghasilkan tebal lapisan sempadan yang tertinggi diikuti oleh sederhana kasar dan licin. Nilai x juga kelihatan berkadaran dengan tebal lapisan sempadan. Begitu juga, keputusan menunjukkan bahawa nombor Reynolds berkadar terus dengan ketebalan lapisan sempadan. Permukaan kasar pada $x = 80 \text{ mm}$ dan nombor Reynolds 28800 menghasilkan ketebalan lapisan sempadan yang paling tebal iaitu 44.7 mm, manakala permukaan licin pada $x = 20 \text{ mm}$ dan nombor Reynolds 10800 menghasilkan ketebalan lapisan sempadan paling nipis iaitu 28 mm.

EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS ON THE BOUNDARY LAYER ON FLAT PLATE

ABSTRACT

The boundary layer had been extensively studied by many researchers especially in the fields of on aerodynamics, automotive design, heat transfer and micro flow sensor. This study is conducted to reduce the drag force and for energy optimizations in order to reduce fuel consumption. Herein, the effects of three surface roughnesses in the range of 0.28 to 4.82 μm and four Reynolds number in the range of 10800 to 28800 to boundary layer thickness are investigated. In addition, the effects of x , which is the length of specimen in horizontal axis is also investigated. The experiment is performed in a closed loop water tunnel with measurements taken by using a PIV system. The results show that the rough surface produced the largest boundary layer thickness followed by the medium rough surface and smooth surface. It's also found that x is proportional with the boundary layer thickness and the Reynolds number is proportional with boundary layer thickness. For the rough surface (at $x = 80 \text{ mm}$) with Reynolds number 28800, the boundary layer is the thickest, around 47.7 mm. However, for the smooth surface at $x = 20 \text{ mm}$ with Reynolds number 10800, shows that, the thinnest boundary layer is 28 mm.

BAB 1

PENGENALAN

1.0 Pengenalan

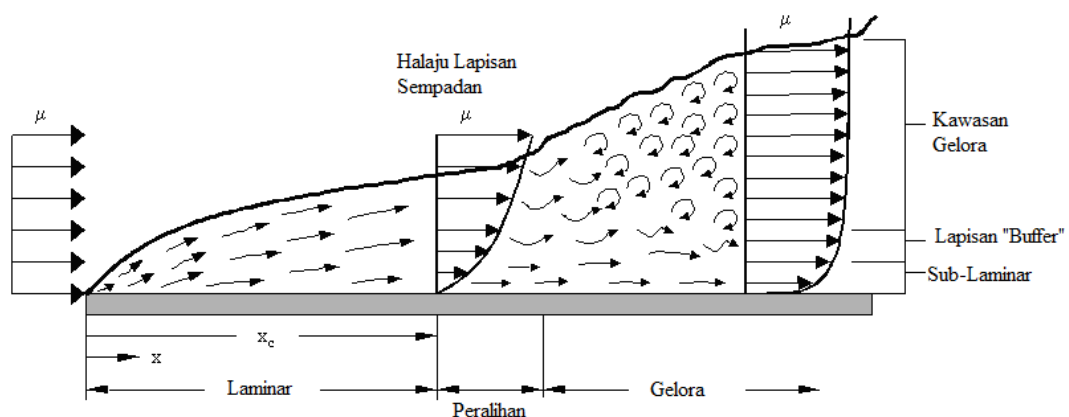
Kajian terhadap fenomena lapisan sempadan adalah sangat penting di dalam sains dan teknologi masa kini. Kejuruteraan aeronatik, pemindahan haba dan peranti aliran adalah bidang-bidang yang dikaitkan dengan fenomena lapisan sempadan. Dalam kejuruteraan aeronatik, para penyelidik mengkaji kesan lapisan sempadan terhadap prestasi aerofoil. Menurut mereka, titik pengasingan (separation point) pada lapisan sempadan ke atas aerofoil perlu dilanjutkan untuk meningkatkan prestasi pesawat seterusnya mengurangkan kos bahanapi, pencemaran bunyi dan pencemaran udara. Pelbagai cara telah dilaksanakan untuk mencapai tujuan tersebut seperti pengawal aliran pengasingan secara aktif dan pasif (Tang, 2006). Selain aerofoil, kajian lapisan sempadan juga dilakukan pada sayap-nasel untuk meningkatkan prestasi pesawat. Kajian kesan kekasaran di atas permukaan nasel terhadap ketebalan lapisan sempadan seterusnya prestasi pesawat sedang giat dilakukan oleh S.Raghunathan et. al (2006). Selain itu, pengawal titik pengasingan juga dilakukan untuk mencapai objektif ini (Raghunathan, 2007).

Ketebalan lapisan sempadan juga mempengaruhi kecekapan pemindahan haba terutamanya bagi jenis perolakan. Dalam keadaan perolakan paksa, haba berpindah secara konduksi didalam lapisan sempadan dan secara perolakan di luar

lapisan sempadan (Holman,1997). Jadi, ketebalan lapisan sempadan perlu dikurangkan sebanyak mungkin untuk meningkatkan prestasi pemindahan haba secara perolakan.

1.1 Asas Ketebalan Lapisan Sempadan

Semasa bendalir mengalir melintasi sesuatu permukaan tegar, halaju lapisan bendalir berkurangan apabila menghampiri permukaan tegar. Fenomena ini berlaku disebabkan oleh geseran di antara permukaan tegar dengan bendalir. Geseran ini disebabkan oleh daya kelikatan didalam bendalir itu sendiri. Zon diantara permukaan dan aliran bendalir bebas ini dikenali sebagai lapisan sempadan iaitu lapisan sempadan yang wujud akibat daripada sifat-sifat aliran bendalir itu sendiri. Lapisan sempadan boleh diklasifikasikan kepada tiga jenis iaitu lamina, peralihan dan gelora. Di dalam zon lapisan sempadan lamina, halaju garisan arus adalah selari antara satu sama lain. Namun, halaju garisan arus berpusar dan tidak seragam berlaku di dalam lapisan sempadan gelora seperti yang ditunjukkan pada Rajah 1.1 di bawah.



Rajah 1.1: Lakaran lapisan sempadan pada plat rata

Sebenarnya, jenis lapisan sempadan bergantung kepada kestabilan antara daya-daya inersia dan daya-daya kelikatan. Contohnya, madu yang dituang dari jar. Bendalir ini mempunyai kelikatan yang tinggi dan besar kemungkinan adalah laminar. Nombor Reynolds (Re) adalah nombor tanpa dimensi yang lazimnya digunakan untuk menentukan aliran bendalir sama ada laminar atau gelora. Nombor Reynolds ditakrif sebagai nisbah diantara daya inersia per daya kelikatan.

Ketebalan lapisan sempadan wujud di antara permukaan tegar dan aliran likat disebabkan oleh lapisan bendalir yang paling hampir dengan permukaan adalah melekit di atas permukaan tegar. Halaju lapisan bendalir ini adalah sifar dan bendalir ini memindah momentum ke lapisan di atas melalui kesan kelikatan. Fenomena ini dipanggil sebagai keadaan tidak gelincir (no slip condition). Sebenarnya, halaju lapisan bendalir di dalam lapisan sempadan adalah lebih rendah daripada bendalir di luar lapisan sempadan. Halaju di dalam lapisan sempadan meningkat perlahan-lahan sehingga ia mencapai halaju bendalir diluar lapisan sempadan (U_{∞}). Ketebalan lapisan sempadan, δ , ditakrif sebagai jarak diperlukan untuk halaju aliran di dalam lapisan sempadan adalah 98 % daripada U_{∞} .

Sifat lapisan sempadan berubah semasa ia terbentuk disepanjang permukaan aerofoil. Umumnya, ia bermula dengan aliran lamina, ketebalan lapisan sempadan berubah ke keadaan peralihan dan seterusnya gelora. Ketebalan lapisan sempadan akan sentiasa meningkat disepanjang permukaan. Walaubagaimanapun, ia berkemungkinan berpisah dari permukaan sekiranya berada di dalam keadaan gelora sepenuhnya. Aliran lapisan sempadan gelora disifatkan sebagai aliran yang berpusar dan tidak menentu disebabkan oleh olakan-olakan pada skala yang besar.

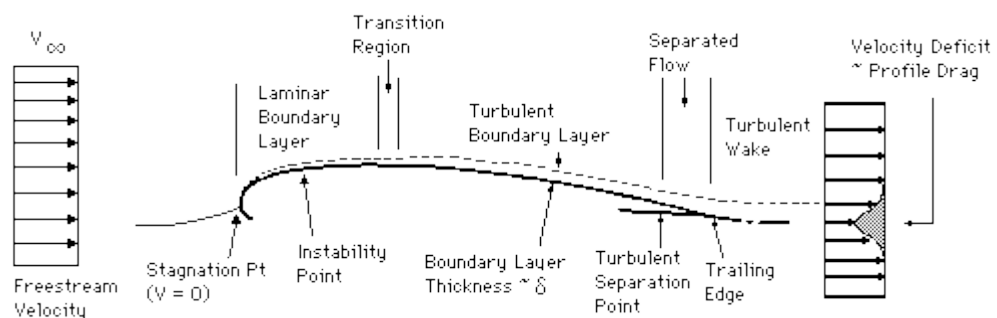
Kesannya, tegasan ricih menjadi lebih tinggi ke atas permukaan, profil halaju yang lebih panjang dan ketebalan lapisan sempadan yang lebih tinggi.

1.2 Aplikasi Lapisan Sempadan Gelora

Tidak seperti lamina, lapisan sempadan gelora mempunyai lapisan halaju yang tidak tersusun dan berpusar. Ia berlaku kerana komponen halaju turun-naik menyebabkan lapisan aliran bercampur dengan kuat. Aspek ini membuatkan lapisan sempadan gelora sesuai digunakan dalam tindakbalas kimia dan pemindahan haba. Contohnya dalam pembakaran, semakin tinggi pencampuran bahan bakar dengan udara, semakin tinggi prestasi pembakaran seterusnya enjin akan lebih berkuasa. Begitu juga dalam penukar haba (heat exchanger), lapisan sempadan gelora meningkatkan pekali pemindahan haba, hasilnya, kecekapan penukar haba bertambah. Namun, bagi sesetengah aplikasi, aliran gelora adalah sangat tidak diingini kerana tegasan ricih di dalam lapisan sempadan gelora lebih tinggi dari lapisan sempadan lamina lalu menyebabkan daya seretan bertambah. Sebagai contoh, aplikasi di dalam kejuruteraan aeronatik. Para penyelidik mencuba sedaya-upaya untuk mengelak lapisan sempadan gelora berlaku pada aerofoil untuk mengurangkan daya seretan pada pesawat. Pengawal pemisahan aliran adalah alat yang digunakan untuk melanjutkan titik pemisahan.

Pada masa kini, pengawal pemisahan aliran boleh dibahagi kepada 2 jenis, iaitu pasif dan aktif. Selain itu, keadaan fizikal aerofoil juga mempengaruhi sifat lapisan sempadan dan seterusnya prestasi pesawat. Realitinya, tiada satu aerofoil yang mempunyai permukaan yang betul-betul licin dan sekata. Di atas permukaan

aerofoil, rivet-rivet dan kimpalan wujud disebabkan oleh kesan proses pembuatan yang tidak dapat dikawal. Kesan ini menjadi lebih ketara terutamanya pada nombor Reynolds yang sangat tinggi dan ketebalan lapisan sempadan yang agak nipis. Dalam keadaan ini, kesan kekasaran permukaan sangat mempengaruhi prestasi pesawat meskipun dalam nilai yang kecil.



Rajah 1.2: Lakaran lapisan sempadan pada aerofoil

1.3 Pernyataan Masalah

Kajian lapisan sempadan telah lama dijalankan semenjak ia ditemui oleh Prandtl pada tahun 1904. Setelah pesawat pertama tercipta, kajian terhadap lapisan sempadan digiatkan untuk meningkatkan lagi prestasi sesuatu pesawat. Banyak kaedah telah dijalankan untuk mengukur ketebalan lapisan sempadan. Tiub-Pitot Manometer adalah alat yang sangat lazim digunakan untuk mengukur ketebalan lapisan sempadan.

Alat ini menggunakan konsep perbezaan tekanan dan seterusnya mentaksir halaju bendalir. LDA (Laser dropped anemometry) adalah alat yang digunakan untuk mengukur ketebalan lapisan sempadan. Ia menggunakan laser dan medium seperti asap untuk mentaksir halaju sesuatu partikel. Ramai pengkaji telah menyiasat kesan kekasaran permukaan terhadap ketebalan lapisan sempadan. Kebanyakan mereka menggunakan tiub-pitot manometer dan LDA untuk mengukur halaju bendalir seterusnya mendapatkan ketebalan lapisan sempadan.

Namun, sehingga tahun 2004, masih tidak ramai (dua kajian) yang menggunakan PIV (Particle Image velocimetry) untuk mengukur halaju garis arus di dalam zon lapisan sempadan dan menilai ketebalan lapisan sempadan serta kesan kekasaran permukaan terutamanya dalam keadaan aliran gelora. Jadi, kajian ini boleh memberi sumbangan dalam memfokuskan kepada kesan kekasaran permukaan yang lebih tinggi berbanding dengan penyelidikan sebelum ini iaitu antara $3.28\ \mu\text{m}$ hingga $4.82\ \mu\text{m}$ bagi menentukan ketebalan lapisan sempadan dengan menggunakan alat pengukur PIV.

1.4 Objektif

Objektif-objektif kajian ini adalah untuk:

- Menentukan tebal lapisan sempadan dengan menggunakan sistem PIV.
- Membandingkan profil halaju purata garis arus pada kekasaran permukaan dan panjang plat spesimen yang berbeza.
- Menyiasat kesan kekasaran permukaan terhadap ketebalan lapisan sempadan
- Mengkaji kesan nombor Reynolds terhadap ketebalan lapisan sempadan di atas permukaan plat yang berlainan kekasaran.

BAB 2

KAJIAN ILMIAH

2.0 Kajian lapisan Sempadan keatas pelbagai permukaan kekasaran

Fenomena lapisan sempadan pertama kalinya ditemui oleh Prandl pada tahun 1907. Beliau membuat kesimpulan bahawa apabila suatu aliran bendalir melalui suatu permukaan, terdapat satu kawasan di atas permukaan tersebut dimana halaju bendalir tersebut lebih perlahan dari halaju bebas disebabkan oleh daya kelikatan. Kawasan tersebut dipanggil lapisan sempadan. Selepas penemuan tersebut, banyak penyelidik mengkaji lapisan sempadan untuk diaplikasi dalam pelbagai lapangan seperti pemindahan haba, aerodinamik dan peranti aliran.

Han et. al (1946) telah menyiasat mengenai lapisan sempadan dan posisi titik peralihan keatas plat rata yang dipanaskan. Mereka mendapati bahawa nombor Reynolds peralihan berkadar songsang dengan suhu permukaan plat. Analisis kualitatif dalam kajian tersebut telah mengambil kira kesan kelikatan dalam lapisan sempadan. Ini kerana perbezaan nilai suhu menghasilkan profil halaju yang infleksi, sekiranya suhu permukaan lebih tinggi dari suhu aliran bebas. Halaju dan suhu profil adalah hampir-hampir sama seperti yang diramal secara teori untuk nombor Prandlt kuasa 1.0 meskipun terdapat perubahan besar pada keadaan Blasius. Penulis juga telah menjalankan kajian keatas aliran dalam pusran besar dan dua dimensi elemen kekasaran. Hasil kajian menunjukkan bahawa lapisan sempadan boleh berpisah dan bercantum kembali dengan permukaan tanpa titik peralihan.

Kesan kekasaran permukaan di bahagian sudut depan plat rata kepada aliran bendalir dan pemindahan haba di dalam zon peralihan lapisan sempadan telah disiasat oleh Pinson dan Wang (1996). Kajian ini dijalankan secara eksperimen bertujuan untuk mendapat kesan bagi pengaruh mekanisma fizikal terhadap proses peralihan lamina-gelora di bahagian sudut depan spesimen. Jalur kertas pasir dan selinder kecil diletakkan pada penjuru hadapan dan dipanaskan untuk simulasi kekasaran, yang lazim terdapat pada penjuru hadapan bilah gas turbin. Nombor Reynolds dalam lingkungan 2 hingga 2840 dilaksanakan dalam kajian ini. Kes halaju kurang 5 m/s, tinggi kekasaran maksimum adalah faktor utama berlakunya lencongan untuk kes bebas gangguan bagi semua geometri kekasaran. Bagi aliran bebas yang lebih tinggi, tiga daripada keadaan pepenjuru kasar menyebabkan wujudnya kawasan dwi-cerun (dual-slope) hubung-kait nombor Stanton diantara lamina dan gelora. Hasil pengukuran lapisan sempadan menunjukkan zon pertama dwi-cerun adalah lamina, namun pemindahan haba dari permukaan cukup untuk memberi perubahan terhadap keputusan tersebut. Segmen kedua adalah peralihan, Kelakuan dwi-cerun yang turun-naik pada nombor Stanton dapat diperhatikan pada halaju aliran bebas yang lebih tinggi. Ia disebabkan oleh ketidaklurusan bertambah hasil dari gangguan terhadap di penjuru hadapan spesimen.

Pimentel et. al (1999) telah membangunkan sistem pengiraan kos rendah untuk meramal aliran yang terbentuk sepenuhnya di dalam saluran simetri dan tidak simetri pada permukaan kasar. Mereka menggunakan model gelora algebra yang telah diubahsuai, aliran dalam salur atau paip untuk beberapa kekasaran permukaan yang berbeza. Agihan halaju dan geseran dalam dua geometri yang berbeza, salur

bebulat dan plat selari telah dikaji. Keputusan simulasi yang telah dibandingkan dengan keputusan eksperimen dari hasil kajian-kajian lepas adalah sepadan.

Sekali lagi, Pinson dan Wang (2000) menyelidik kesan kekasaran dua skala (two-scale roughness) ke atas sempadan lapisan peralihan pada plat rata yang dipanaskan. Dalam penyelidikan ini, halaju dan suhu diukur didalam lapisan sempadan peralihan pada dua skala kekasaran yang berbeza. Kelihatan terdapat variasi yang terputus-putus (intermittency) secara konsisten melalui kawasan peralihan untuk model permukaan licin. Ramalan permulaan titik peralihan adalah kurang tepat disebabkan oleh ketebalan momentum untuk kes-kes gangguan permukaan yang tinggi. Didalam zon peralihan, kekasaran telah menyebabkan pengurangan kenaikan turun-naik halaju disebabkan oleh kehilangan halaju yang lebih tinggi dan peningkatan pergerakan “wallward” momentum yang ketara, tidak sepadan peningkatan pergerakan termal. Perbezaan kekasaran menyebabkan perubahan pada aliran dan menunjukkan kesan ketara terhadap sifat-sifat lapisan sempadan. Analisis “wavelet” mengatakan bahawa peralihan ke atas permukaan kasar dalam mod pirau (bypass) berkemungkinan disebabkan oleh gangguan berasal dari lebar lingkaran spektra yang membesar.

Lapisan sempadan pada permukaan ikan yang berenang telah dikaji oleh Anderson et.al (2001). Profil halaju tangen dan normal lapisan sempadan disekeliling ikan hidup sedang berenang diukur dengan menggunakan DPTV (Digital Particle Tracking Velocimetry). Dua jenis spesies ikan yang telah dikaji, stenotomus chrysops, ikan jenis carangiform dan *Mustelus canis*, ikan jenis anguilliform.

Pengukuran-pengukuran telah diambil pada beberapa lokasi disekeliling permukaan ikan. Nombor Reynolds untuk ujikaji ini adalah dalam lingkungan 3×10^3 kepada 3×10^5 . Profil lapisan sempadan ditemui sepadan dengan profil laminar dan gelora yang yang dicadangkan oleh Blasius, Falkner, Skan dan hukum permukaan. Dalam air, bentuk profil lapisan sempadan secara teorinya adalah lamina pada nombor Reynolds yang rendah dan gelora pada nombor Reynolds yang tinggi. Dalam kes tertentu, bentuk profil lamina dan gelora sering bertukar-ganti apabila melalui sesuatu jasad. Pekali rintangan tempatan, ketebalan lapisan sempadan dan halaju bendalir pada penjuru lapisan sempadan adalah parameter yang telah dikaji dalam menentukan prestasi lapisan sempadan. Sifat-sifat parameter ini berubah dengan ketara di dalam lapisan sempadan untuk kes ikan yang telap. Ikan yang sedang berenang mempunyai rintangan seretan yang lebih tinggi dari ikan yang pegun di dalam aliran. Kesannya, ikan tersebut memerlukan lebih kuasa untuk mengatasi daya seretan. Tiada titik pemisahan berlaku untuk ikan yang sedang berenang.

2.1 Kajian lapisan sempadan gelora ke atas kekasaran permukaan plat rata

Kajian pada lapisan sempadan gelora ke atas plat rata yang licin dalam saluran terbuka telah dijalankan oleh Ram Balachandar et. all (2001). Kajian ini bertujuan untuk menyelidik sifat-sifat lapisan sempadan gelora yang terbentuk pada plat rata licin pada nombor Froude yang sederhana tinggi ($0.25 < Fr < 1.1$) dan nombor Reynolds yang rendah. ($800 < Re < 2900$). Pengukuran halaju bendalir diukur dengan menggunakan peralatan LDA yang mana alat ini berkemampuan untuk mengukur

halaju yang berhampiran dengan permukaan. Pembolehubah-pembolehubah yang dikaji dalam penyelidikan ini termasuklah halaju purata longitud, keamatan gelora (turbulent intensity) dan taburan kerataan (flatness distribution). Kesan-kesan nombor Froude terhadap parameter-parameter juga diuji oleh penyelidik ini. Hasil daripada kajian, mereka mengatakan bahawa dalam lingkungan nombor Reynolds yang telah dikaji, pekali geseran kulit (skin friction coefficient) adalah lebih tinggi dari yang dinyatakan dalam “kon aliran perbezaan tekanan sifar” (canonical zero pressure gradient flows.). Pekali geseran kulit berkadar sonsang dengan ketebalan momentum nombor Reynolds dan bersandar kepada nombor Froude. Hukum log (log-law) yang diperolehi dalam ujikaji tersebut sesuai digunakan untuk ketebalan momentum nombor Reynolds dan nombor Froude dalam lingkungan $800 < Re < 2900$ dan $0.25 < Fr < 1.1$ masing-masing. Parameter keracak Coles (Coles wake) adalah 0.55 dan diperolehi daripada kecerunan tekanan sifar. Puncak keamatan gelora meningkat dengan ketebalan momentum nombor Reynolds dan nombor Froude. Pada nombor Froude yang lebih tinggi, didapati nombor Reynolds adalah tidak berubah dengan halaju.

Kajian terhadap kesan-kesan arus bebas gelora pada kombinasi perolakan lapisan sempadan disepanjang plat mendatar yang dipanaskan telah dikaji oleh Hattori (2001). Kajian ini dijalankan secara eksperimen dengan menggunakan peralatan norma wayar sejuk dan panas serta PIV bagi mengukur proses pelaminaan lapisan sempadan disebabkan oleh kesan-kesan arus bebas. Penulis mengatakan bahawa halaju arus bebas berkadar lansung dengan tegasan ricih permukaan namun berkadar sonsang dengan kadar pemindahan haba tempatan. Pengurangan kadar pemindahan haba dan penyusutan turun-naik halaju dan suhu ditunjukkan dalam

kawasan peralihan lamina kepada gelora. Pergerakan-pergerakan bendalir skala besar memainkan peranan penting dalam menghasilkan gelora adalah sering berlaku di sebelah luar lapisan sempadan, sementara struktur kuansi-lekitan (quansi-coherent) tidak wujud dalam kawasan berhampiran permukaan. Arus bebas semakin bertambah seterusnya pergerakan bendalir berskala-besar menjadi terhad di lapisan yang lebih luar, akhirnya penghasilan gelora terhenti dan lapisan sempadan menjadi lamina berlaku.

Kesan-kesan kekasaran permukaan pada struktur lapisan sempadan gelora telah dikaji oleh Keirsbulck et. al (2002). Struktur lapisan sempadan gelora terbina atas permukaan kasar jenis-K didapati terdapat beberapa perubahan jika dibandingkan dengan permukaan licin, manakala magnitud kekuatan olakan bergantung kepada kekasaran permukaan. Pemerhatian eksperimen menunjukkan bahawa dalam zon bersebelahan dengan permukaan dan kekasaran permukaan adalah faktor penting kepada pecahan tegasan ricih Reynolds. Di permukaan tegar, faktor-faktor resapan (diffusion) dipengaruhi oleh kekasaran permukaan dimana keadaan sapuan (sweep) mendominasi suntikan (injection), kelaziman ini adalah berlawanan bagi permukaan licin. Bagi proses pengesahan, PIV telah digunakan untuk memperolehi medan turun-naik aliran di dalam lapisan sempadan gelora. Analisa bajet tenaga (energy budget analysis) menunjukkan di kawasan berhampiran permukaan, halaju aliran pada permukaan licin adalah lebih tinggi dari permukaan kasar. Situasi berubah-ubah pada paksi menegak dan melintang untuk permukaan licin dan kasar dibandingkan untuk dengan gelora model. Penyelidik telah membuat kesimpulan bahawa kesan-kesan kekasaran permukaan mesti diambil kira dalam simulasi model gelora.

Bergstrom et. all (2002) telah menyiasat kesan kekasaran permukaan kepada profil halaju purata untuk lapisan sempadan gelora. Kajian dijalankan secara eksperimen dan dilakukan dalam terowong angin untuk empat keadaan kekasaran yang berbeza dan nombor Reynolds yang sederhana. Keputusan menunjukkan bahawa jenis kekasaran permukaan memberi kesan kepada profil cacat purata (mean defect profile) dalam kawasan yang lebih luar dalam lapisan sempadan gelora. Perbandingan halaju purata dan profil cacat telah menunjukkan perbezaan-perbezaan sifat antara permukaan kasar dan licin, begitu juga dengan permukaan-permukaan yang berbeza kekasaran. Nilai geseran lapisan turut dikira dalam kajian tersebut. Profil kecacatan normal halaju geseran adalah hampir tidak dipengaruhi oleh nombor Reynolds. Keputusan juga menunjukkan bahawa aliran yang lebih luar adalah sangat dipengaruhi oleh sifat-sifat kekasaran spesifik pada permukaan. Pada permukaan kasar, lapisan-lapisan sempadan adalah lebih kompleks daripada hipotesis.

Lapisan sempadan pada permukaan kasar pada plat yang berada di dalam saluran terbuka telah dikaji oleh Balachandar dan Patel (2002). Kajian ini dilaksanakan secara eksperimen dan bertujuan mengenalpasti ciri-ciri lapisan sempadan gelora yang terbentuk pada permukaan kasar. Pengukuran halaju garis arus dilakukan dengan menggunakan sistem LDA pada bahagian atas elemen kekasaran membulat. Pengukuran-pengukuran dilakukan pada tiga titik lokasi di penjuru depan plat telah menunjukkan lapisan sempadan membesar pada dinding kasar dan ia berinteraksi dengan aliran luaran saluran terbuka. Aliran bersebelahan permukaan adalah mengikut hukum logaritma disebabkan oleh kekasaran. Di bahagian lapisan yang lebih jauh dari permukaan, dua kesan berlainan telah diperhatikan iaitu permukaan licin berkecenderungan untuk mengurangkan

komponen pusaran dan kekasaran menyebabkan komponen pusaran bertambah. Keamatan garis arus gelora sangat dipengaruhi oleh gelora dan ricih yang berada pada aliran luar lapisan sempadan.

Eksperimen kesan kekasaran ke atas lapisan sempadan gelora di dalam saluran terbuka bagi nombor Reynolds yang rendah telah dijalankan oleh Tachie et. all (2003). Mereka melakukan eksperimen pada permukaan licin dan dua geometri kekasaran yang berbeza dalam saluran terbuka. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan sistem LDA. Teori yang diperkenalkan oleh George dan Castello (1997) dan hukum-hukum pengukuran konvensional (conventional scaling laws) digunakan untuk menganalisa data. Keputusan menunjukkan kekasaran permukaan meningkatkan pusaran dan aras keamatan gelora. Tegasan ricih Reynolds dan hubungkait ganda tiga (triple correlation) berlaku di kebanyakan lapisan sempadan, bagaimanapun, tegasan anisotropi mengalami penurunan. Kekasaran permukaan juga sangat mempengaruhi parameter gelora. Contohnya, kekasaran meningkatkan aras keamatan gelora, tegasan ricih Reynolds dan peningkatan isotropi bagi kebanyakan lapisan sempadan kesan daripada percampuran pusaran yang dihasilkan oleh elemen kekasaran.

Kajian terhadap terma dan halaju lapisan-lapisan sempadan pada plat rata dibawah pengaruh gelora berkeadaan sangat tinggi dan aliran udara yang tidak stabil telah dijalankan oleh Kondjoyan et. all (2004). Nombor Reynolds yang digunakan dalam eksperimen ini adalah dalam lingkungan 8400-127000. Profil halaju dan suhu dalam lapisan sempadan telah diukur untuk kes plat rata yang telah diletakkan dalam arus bebas gelora yang berkeamatan dalam lingkungan dari 1 hingga 50%. Nilai

keamatan gelora paling besar disertai oleh arus yang tidak stabil dalam skala yang sangat besar. Pada keamatan gelora dalam arus utama $Tu_{\infty} = 1\%$, profil suhu dan halaju adalah berpadanan dengan penyelesaian Blasius yang mengambil kira kesan ketebalan lapisan sempadan sebenar kedalam persamaan. Pada $Tu_{\infty} = 6\%$, lapisan-lapisan sempadan halaju dan terma, ketebalan momentum dan anjakan adalah sangat kecil. Satu kawasan pusaran kelihatan dan terdapat peningkatan cerun pada kawasan berhampiran dengan permukaan. Keputusan juga menunjukkan tenaga gelora turut terhasil dalam lapisan sempadan.

Peneau et. all (2004) mengkaji struktur profil terma berhampiran bucu hadapan plat rata bagi aliran tidak mampat pada lapisan sempadan yang disubjekkan pada arus bebas gelora. Kajian ini dilakukan secara simulasi dengan menggunakan kaedah LES (Large Eddy Simulation) model subgrid dinamik. Keamatan arus bebas gelora yang dikaji adalah dalam lingkungan 1.5 hingga 10%. Evolusi profil halaju, suhu dan keamatan gelora di dalam lapisan sempadan dan sifat-sifat skala panjang (length scale) dianalisa dan dibandingkan dengan lapisan sempadan plat rata dalam keadaan lamina. Kesan arus bebas gelora juga disiasat untuk nombor Reynolds dalam lingkungan 0 hingga 8×10^4 . Peralihan pirau ditemui berlaku dalam kawasan permulaan pembentukan lapisan sempadan untuk kelima-lima kes. Analisis menunjukkan struktur terma gelora memindahkan lebih banyak haba dan meningkatkan penghasilan turun-naik terma dalam pusaran jika dibandingkan dengan struktur lamina.

2.2 Kajian lapisan sempadan ke atas kekasaran permukaan yang dihabakan

Hendricks dan Ladd (2003) telah menyiasat kesan kekasaran permukaan untuk melewati titik peralihan pada ellipsoid yang dipanaskan. Alat-alat pengukuran telah dibangunkan pada ellipsoid mempunyai nisbah keberkesanan (fineness ratio) 9:1 untuk pelbagai kekasaran permukaan, suhu dan keadaan aliran bagi meningkatkan kesan kekasaran permukaan yang boleh mengganggu peralihan lamina-gelora lapisan sempadan dalam air. Lokasi peralihan lapisan sempadan untuk nombor Reynolds dalam lingkungan daripada 3.0 hingga 7.0 telah diperolehi dalam eksperimen tersebut. Ellipsoid telah diuji pada tiga peringkat suhu permukaan. Setiap kekasaran permukaan (4, 1.9 dan 0.15) pengukuran titik peralihan dibuat tanpa melibatkan haba; $\Delta T = 10$ dan 15°C , dimana ΔT adalah perbezaan diantara suhu air masuk dan suhu air aliran bebas. Keputusan yang diperolehi adalah bagi setiap pengurangan kekasaran permukaan, panjang aliran laminar untuk setiap model meningkat untuk ketiga-tiga suhu. Suhu permukaan yang bertambah menyebabkan sensitiviti lokasi peralihan berubah.

Gulich (2003) telah menyelidik kesan nombor Reynolds dan kekasaran terhadap kecekapan pam empar. Prosedur ini dibangunkan untuk meramal prestasi pam empar untuk beberapa nombor Reynolds dan kekasaran yang berlainan dari model hingga ke prototaip. Analisis kehilangan yang disiasat dalam eksperimen ini bagi kes kekasaran yang berbeza pada pendesak, peresap dan dinding perumahan (casing). Kajian ini juga dilakukan untuk meramal kesan kekasaran dan nombor Reynolds terhadap kecekapan hidraulik. Kehilangan kecekapan pada pendesak dan peresap didapati berkurang dengan pertambahan laju tentu. Kesan kekasaran kepada

peresap adalah lebih ketara daripada pendesak. Prosedur eksperimen merangkumi semua jenis aliran dari lamina ke gelora dan daripada permukaan licin hingga kasar. Ia telah disahkan dengan ujian kelikatan diantara 0.2 hingga 3000 cSt dan nombor Reynolds diantara 1.5×10^3 hingga 10^8 . Keputusan menunjukkan bahawa kehilangan hidraulik bergantung kepada corak kekasaran, gelora sebelah-dinding dan agihan halaju sebenar dalam laluan hidraulik.

Loureiro dan Freire (2005) telah menyiasat lapisan-lapisan sempadan gelora di atas dua dimensi plat pengangkat yang curam (steep elevations) secara eksperimen. Dua fokus utama yang dikaji oleh mereka iaitu pertama, untuk menyiasat dan mengenalpasti sifat-sifat kawasan aliran terpisah yang terbentuk pada permukaan atas pengangkat dan kedua, untuk menilai kesan-kesan kestabilan aliran kepada profil lapisan sempadan yang disubjekkan pada permukaan plat. Sebelum memulakan ujikaji ini, penyiasatan saluran air dan udara telah dilaksanakan. Pada kes-kes yang lepas, susun-lapis (stratified) semulajadi lapisan sempadan disiasat dalam saluran air makmal hidraulik. Halaju purata dan gelora telah diukur dengan menggunakan LDA. Keputusan dari daya ricih gelora menunjukkan $\langle u'u' \rangle$ mendapat kembali nilai maksimum yang tidak berubah dalam kawasan berhampiran permukaan. Untuk kawasan yang lebih keluar dari permukaan, $\langle u'u' \rangle$ menurun dan untuk $\langle w'w' \rangle$ meningkat sebanyak 50% dan ia dapat diperhatikan pada puncak permukaan curam apabila dibandingkan dengan nilai asal. Seterusnya, profil halaju purata dan suhu telah diukur dengan bantuan terma anemometri dan dijalankan di dalam terowong angin. Hasil menunjukkan bahawa keadaan aliran yang stabil menyebabkan pengurangan laju manakala keadaan aliran tidak stabil meningkatkan laju. Mereka mengatakan bahawa pemindahan gelora sangat mempengaruhi medan

skalar berhampiran permukaan. Profil halaju purata diukur melalui anemometri wayar panas (hot-wire anemometry) dan hasil yang diperolehi menunjukkan bahawa perubahan dalam penstrataan (stratification) telah mempengaruhi perlanjutan kawasan pusaran dan memberi kesan kepada medan aliran purata.

2.3 Kajian lapisan sempadan ke atas kekasaran permukaan yang berputar

Zoueshtiagh et. all (2003) telah menyiasat titik peralihan lapisan sempadan pada cakera yang kasar berputar di tengah. Nombor Reynolds peralihan (Re_c) dan profil halaju lapisan sempadan telah diukur dengan menggunakan alat pengukuran “flow-visualization” dan “hot-film”. Nilai Re_c dan profil halaju yang dikaji dikaitan dengan fungsi persamaan kekasaran piring permukaan. Kekasaran permukaan kurang mempengaruhi Re_c sehingga nilai ambang kekasaran relatif tercapai. Di atas nilai tersebut, Re_c turun dengan menjunam.

Maurus dan Sattelmayer (2004) menyelidik kelakuan buih dan lapisan sempadan dalam sub-penyejukan aliran mendidih. Penyelidikan dilakukan secara eksperimen pada keadaan pendidihan nukleus di dalam terowong segiempat gelung tertutup pada tekanan atmosfera. Kawasan eksperimen mengandungi saluran segimepat yang mana satu bahagian tepi dipanaskan dengan jalur tembaga serta mesra optik. Pelbagai teknik pemerhatian optik telah dijalankan untuk mengkaji kelakuan dan sifat-sifat buih dalam fasa bendalir. Kelakuan buih direkod dengan sinematografik berkelajuan tinggi dan digital kamera berevolusi tinggi. Dengan menggunakan kaedah ini, buih-buih akan dianalisis secara automatik, seterusnya

saiz, jangka hayat, dan masa antara dua kitar buih-buih dapat dinilai. Keputusan menunjukkan bahawa buih-buih meningkatkan rintangan aliran dan nisbah sempadan purata manakala halaju bendalir purata telah dikira dalam ujikaji tersebut untuk kawasan buih.

Zhang et. all (2004) telah menyelidik kesan kekasaran permukaan kepada prestasi turbin aerodinamik pada peringkat-peringkat kemasukan aliran gelora yang berbeza iaitu 0.9%, 5.5% dan 16.2%. Tiga jenis airfoil yang simetri mempunyai bentuk dan dimesi luaran yang sama tetapi kekasaran permukaan yang berbeza diteliti diselidiki dalam eksperimen tersebut. 3-D kekasaran yang tidak uniform dan tidak sekata telah ditanam pada permukaan aerofoil dengan menggunakan biji-biji pasir yang berdiameter sama saiz. Nombor Mach yang digunakan dalam penyelidikan ini adalah dalam lingkungan 0.4 hingga 0.7 dan nombor-nombor Reynolds perentas (chord) adalah dalam lingkungan 0.54×10^6 dan 1.02×10^6 . Keputusan menunjukkan kesan kekasaran permukaan pada perubahan nilai IAL (Integrated Aerodynamic Losses) adalah sangat ketara.

Roberts dan Yaras (2005) telah membincangkan kesan-kesan kekasaran permukaan dalam aliran bebas gelora kepada peralihan lapisan sempadan secara eksperimen. Spesimen yang digunakan adalah plat rata manakala eksperimen dijalankan dalam keadaan taburan tekanan yang sama (pressure distribution similar) dengan bahagian sedutan turbin bertekanan rendah. Lima kekasaran permukaan yang berbeza telah dikaji. Setiap satu kekasaran diuji dengan tiga arus bebas gelora yang berbeza dan dua nombor Reynolds iaitu 350000 dan 470000. Kajian ini memberi penekanan kepada buih pemisahan (separation-bubble) dan beberapa aliran sangkut

(attached-flow) dalam kekasaran permukaan yang tinggi. Keputusan eksperimen menunjukkan bahawa dalam bilah turbin gas, kekasaran permukaan dan arus bebas gelora memberi kesan yang sama terhadap titik permulaan buih pemisahan. Untuk eksperimen permukaan kekasaran yang tinggi, elemen kekasaran (roughness element) berada di bawah kawasan peralihan lapisan ricih buih. Dalam keadaan kekasaran permukaan tinggi juga, didapati bahawa kekasaran memberi kesan yang lebih tinggi sedikit kepada titik permulaan pemisahan dari arus bebas gelora.

Simulasi berangka pada tumbesaran ais (ice accretion) ke atas sayap pesawat telah dikaji oleh White dan Oliver (2005). Simulasi yang dijalankan oleh penyelidik ini berdasarkan kepada analisa ruang kawal pemindahan haba dan pembekuan. Penyelidik juga mengambilkira kesan kekasaran permukaan dan bentuk-bentuk lain pada pergerakan air cecair dan perolakan pemindahan haba. Dalam kajian tersebut, simulasi adalah mengikut model tumbesaran ais yang disadur dengan sifat-sifat fizikal yang sebenar. Bagi meningkatkan keupayaan simulasi, satu eksperimen memeriksa fenomena mikro-skala dalam pengaisan (icing) lapisan sempadan telah dijalankan dan memeriksa telah dilakukan berulang-kali tentang kesan kekasaran permukaan. Mereka menyiasat peranan kekasaran dalam lapisan sempadan secara kasar, namun memberi penekanan terhadap kesan kekasaran kepada peralihan lamina ke gelora. Keputusan yang telah diperolehi menunjukkan bahawa kekasaran permukaan mengakibatkan pembesaran zon peralihan. Mereka juga membincangkan kemudahan eksperimen terkini dikenali sebagai makmal aliran pengaisan fizik. Kemudahan ini direkabentuk untuk menempatkan eksperimen pengesahan pada simulasi berangka untuk kes fenomena mikro-skala pengaisan.

Rahman dan Webster (2005) meneroka kesan kekasaran pada skala naik-turun dalam lapisan sempadan gelora. Kesan kekasaran pada gumpalan kimia isokinetik kedalam kawasan lapisan sempadan telah dikaji dalam aliran saluran terbuka. Kekasaran dipelbagaikan secara sistematik iaitu permukaan licin, pertengahan dan kasar. Medan tumpuan diukur dalam satah mendatar dengan menggunakan teknik PLIF (Planar-induced Fluorescence). Purata masa tumpuan adalah mengikut profil melintang Gaussian untuk semua kekasaran. Apabila kekasaran menurun, turun-naik menjadi semakin kecil dan menurun dengan lebih pantas. Zon berhampiran dengan sumber gumpalan, profil melintang lencongan piawai dan skala turun-naik adalah sama dan mengikut Gaussian. Untuk dua permukaan yang lebih kasar, agihan melintang telah lencongan dari piawai peralihan di hilir kepada profil bi-model. PDFs (probability density functions) turun-naik bertumpu di zon berhampiran sumber plume dan mempunyai pengagihan herot (skewed) yang tinggi. Permukaan yang semakin kasar mempercepatkan penghampiran PDFs kepada agihan Gaussian.

Kajian terhadap aliran lapisan sempadan ke atas plat rata yang telap dan mendatar telah dikaji oleh Aydin dan Kaya (2005). Analisis ini dilakukan untuk menyiasat aliran lapisan sempadan ke atas plat rata yang berliang dengan menyuntik (injection) dan menyedut (suction) aliran dari permukaan. Dua teknik analisa yang berbeza telah digunakan untuk menyelesaikan persamaan lapisan sempadan iaitu penyelesaian berangka dan keserupaan. Keadaan suhu permukaan yang kekal telah digunakan untuk plat rata dan mendatar. Kesan nombor Prandtl terhadap pemindahan haba juga disiasat oleh penyelidik-penyelidik. Pekali geseran dan nombor Nusselt telah dikira untuk suntikan dan sedutan yang malar di sepanjang

permukaan plat. Keputusan menunjukkan bahawa sedutan meningkatkan pekali pemindahan haba sementara suntikan menyebabkan pemindahan haba menurun.

Lapisan sempadan gelora atas plat pada nombor Reynolds yang tinggi telah dijalankan oleh Angele dan Klingman (2006). Eksperimen dilakukan dalam terowong angin dan profil halaju diukur dengan menggunakan alat pengukuran PIV. Melalui PIV, mereka berkebolehan untuk mendapat gambar lengkap yang lebih besar untuk fenomena aliran kompleks. Database PIV digunakan untuk menguji keterterapan (applicability) untuk pelbagai penskalaan halaju disekeliling buih pemisahan. Dari keputusan dan analisa yang diperolehi dari eksperimen, beliau mendakwa terdapat hubungkait antara kedua-dua skala halaju dan tegasan-ricih Reynolds maksimum.

2.4 Ringkasan Keseluruhan dari Kajian Ilmiah di atas

Pemerhatian eksperimen menunjukkan bahawa kekasaran permukaan adalah faktor penting kepada pecahan tegasan ricih Reynolds. Di permukaan tegar, faktor-faktor resapan (diffusion) dipengaruhi oleh kekasaran permukaan dimana keadaan sapuan (sweep) mendominasi suntikan (injection), kelaziman ini adalah berlawanan bagi permukaan licin. Bagi proses pengesanan, PIV telah digunakan untuk memperolehi medan turun-naik aliran di dalam lapisan sempadan gelora.

Keputusan eksperimen menunjukkan bahawa dalam bilah turbin gas, kekasaran permukaan dan arus bebas gelora memberi kesan yang sama terhadap titik

permulaan buih pemisahan. Untuk eksperimen permukaan kekasaran yang tinggi, elemen kekasaran (roughness element) berada di bawah kawasan peralihan lapisan ricih buih. Dalam keadaan kekasaran permukaan tinggi juga, didapati bahawa kekasaran memberi kesan yang lebih tinggi sedikit kepada titik permulaan pemisahan dari arus bebas gelora.

Ketebalan lapisan sempadan akan sentiasa meningkat disepanjang permukaan. Walaubagaimanapun, ia berkemungkinan berpisah dari permukaan sekiranya berada di dalam keadaan gelora sepenuhnya. Aliran lapisan sempadan gelora disifatkan sebagai aliran yang berpusar dan tidak menentu disebabkan oleh olakan-olakan pada skala yang besar. Kesannya, tegasan ricih menjadi lebih tinggi ke atas permukaan, profil halaju yang lebih panjang dan ketebalan lapisan sempadan yang lebih tinggi.

BAB 3

PENYEDIAAN EKSPERIMEN

3.0 Pemasangan Eksperimen

Terowong air litar tertutup adalah salah satu daripada peralatan penting yang digunakan di dalam kajian ini. Terowong air litar tertutup telah dibangunkan oleh Hamid (2006). Komponen-komponen di dalam terowong air litar tertutup adalah tangki air, pam magnet, pengawal pam, dua injab, indung madu (honeycomb), penakung penetapan (settling chamber), pengecutan (contraction), zon eksperimen, peresap (difusser), dan paip PVC sistem seperti yang ditunjukkan pada Rajah 3.1. Prestasi litar tertutup telah direkabentuk untuk memastikan pengawalan aliran kembali bersama-sama biji partikel untuk kajian beberapa nombor Reynolds yang berbeza. Terowong air litar tertutup dengan pendesak tunggal telah disambungkan kepada sebuah alatan pengawal pam. Media bendalir kerja yang digunakan dalam eksperimen ini adalah air.

Halaju maksimum bendalir pada zon eksperimen adalah 0.65 m/s. Indung madu diletakkan di pintu masuk zon eksperimen untuk memperolehi aliran seragam. Jenis bahan zon eksperimen diperbuat dari Plexiglas dan cermin untuk ke empat-empat bahagian supaya pemasangan dan pemerhatian lebih mudah dilaksanakan. Pemasangan konfigurasi terowong air ditunjukkan pada Jadual 3.1.